

БЕССТУПЕНЧАТЫЕ ПЕРЕДАЧИ И ЗАКОН ИЗМЕНЕНИЯ ИХ ПЕРЕДАТОЧНЫХ ЧИСЕЛ

А.Д. Рулевский, А.Г. Уланов, А.И. Хахалев

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

В настоящее время с целью эффективного использования энергетических ресурсов двигателя и реализации требуемых показателей тягово-скоростных и топливно-экономических свойств автомобиля производители стремятся придать конструкции трансмиссии определённые свойства, которые позволят обеспечить наиболее полное согласование их совместной работы. Однако даже оптимальное конструктивное решение не может быть универсальным, т. е. то, что хорошо для одних условий эксплуатации, не эффективно для других условий. Поэтому сегодня экономически целесообразным считается создание транспортных средств, предназначенных для определённого, сравнительно узкого диапазона условий эксплуатации.

Широкий спектр современных бесступенчатых передач, а также систем автоматического управления дают возможность кардинально поменять подход к проектированию трансмиссий транспортных средств. Остается только определиться с алгоритмами изменения передаточного числа бесступенчатой трансмиссии. Предлагается методика выбора оптимальных передаточных чисел бесступенчатой трансмиссии автомобиля с учетом режимов движения и работы его двигателя. Полученные результаты расчета тягово-динамических и топливно-экономических показателей автомобиля с бесступенчатой трансмиссией, передаточные числа которой во время движения изменялись в соответствии с предлагаемой методикой, в сравнении с реально существующим прототипом, подтвердили принятую гипотезу оптимизации и дают все основания для рекомендации применения данной методики на практике при выборе передаточных чисел бесступенчатой трансмиссии в зависимости от режима движения автомобиля.

Ключевые слова: автомобиль, бесступенчатая трансмиссия, вариатор, разгон, передаточное число.

Введение. Многообразие существующих в настоящее время автомобилей определяется ростом требований, предъявляемых к ним со стороны потребителей. С целью эффективного использования энергетических ресурсов двигателя и реализации требуемых показателей тягово-скоростных и топливно-экономических свойств автомобиля производители стремятся придать конструкции трансмиссии определённые свойства, которые позволят обеспечить наиболее полное согласование их совместной работы [1, 6, 9, 10, 12, 13, 17, 19, 20].

Эффективность процесса согласования совместной работы двигателя и трансмиссии, определяемая соответствием проектируемого автомобиля своему функциональному назначению, во многом зависит от применяемых методов проектирования. Для совершенствования этого процесса необходимо применение методов оптимального проектирования [2, 4, 5, 7, 8, 15]. В этой связи большой интерес представляют исследования, направленные на раскрытие потенциала системы «двигатель – трансмиссия», на сегодняшний день исчерпавшие возможности технического совершенствования механических ступенчатых трансмиссий [11, 14, 16, 18]. Решение данной задачи возможно только за счёт применения других типов трансмиссий и формирования оптимальных режимов управления трансмиссиями.

Анализ продукции передовых фирм-производителей автомобилей показывает, что в рамках практически каждой производимой ими модели реализуются различные варианты силовых агрегатов (типы и объёмы двигателей) и трансмиссий (типы трансмиссий и варианты передаточных чисел). Это позволяет в рамках одной модели обеспечить широкий диапазон эксплуатационных характеристик и существенно повысить ее покупательную способность. Появление на рынке бесступенчатых трансмиссий дает возможность для одной модификации автомобиля решить эту проблему за счёт выбора оптимальных, в зависимости от поставленной задачи, параметров трансмиссии. Разнообразие конструкций современных вариаторов, а также средств автоматиза-

Расчет и конструирование

ции и управления предоставляет возможность сделать этот процесс управляемым и оптимальным с точки зрения показателей его динамичности и топливной экономичности.

В настоящее время скоростной режим автомобиля определяется скоростью транспортного потока, рекомендациями дорожных знаков, сложившейся дорожной обстановкой, настроением водителя, но только не условиями оптимального режима движения в данной ситуации. Нет и инструмента, который бы позволил задать, а затем проконтролировать этот процесс.

Целью данной работы является разработка математической модели для определения текущих значений передаточного числа бесступенчатой трансмиссии автомобиля в зависимости от режима его движения.

1. Математическая модель. Максимально возможное ускорение автомобиля при работе двигателя с полной подачей топлива определяется из уравнения тягового баланса [3]

$$j = \frac{dv}{dt} = (D - \psi) \frac{g}{\delta}, \quad (1)$$

где j – ускорение автомобиля; v – скорость автомобиля; t – время разгона; D – динамический фактор; ψ – коэффициент сопротивления дороги; g – ускорение свободного падения; δ – коэффициент учета вращающихся масс.

Исследуя данную функцию изменения ускорения автомобиля от скорости его движения (1) на экстремум, было получено выражение для определения значений передаточного числа трансмиссии в зависимости от скорости движения автомобиля

$$i_{\text{тр}} = -2 \sqrt{\frac{0,0628 r_k^2 n_N^2}{v^2} \cos\left(\varphi + \frac{2}{3}\pi\right) + \frac{0,1253 r_k n_N}{v}}, \quad (2)$$

где r_k – радиус качения колеса; n_N – обороты двигателя при максимальной мощности; v – скорость автомобиля.

В уравнении (2) величина φ равна

$$\varphi = \frac{1}{3} \text{Arccos} \left(\frac{0,000469 G_a v}{N_{\text{max}} \eta_{\text{тр}}} \left[\frac{kF v^2}{13 G_a} + f_0 (1 + k_1 v^2) \right] - 0,6875 \right),$$

где G_a – полный вес автомобиля; v – скорость автомобиля; N_{max} – максимальная мощность двигателя; $\eta_{\text{тр}}$ – коэффициент полезного действия трансмиссии; kF – фактор обтекаемости; f_0 – коэффициент сопротивления качению при малых скоростях; k_1 – коэффициент, равный $(4 \dots 5)10^{-5}$.

На рис. 1 в качестве примера представлена предлагаемая закономерность (2) изменения передаточного числа вариатора в зависимости от скорости движения автомобиля Subaru Impreza 2.0R.

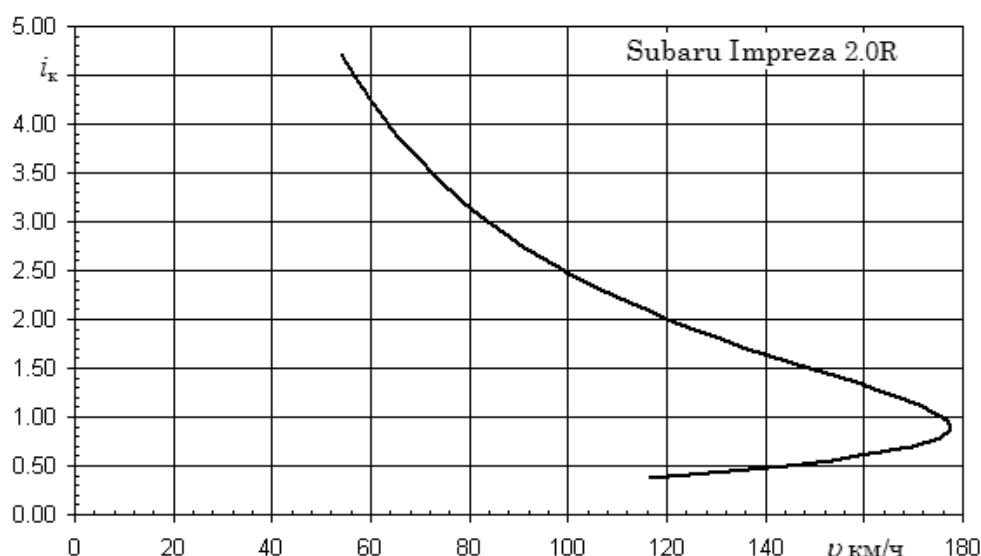


Рис. 1. Закономерность изменения передаточного числа вариатора в зависимости от скорости движения автомобиля Subaru Impreza 2.0R

Использование закономерности (2) при выборе передаточного числа бесступенчатой трансмиссии в зависимости от скорости движения позволило обеспечить автомобилю максимальную динамику разгона, т. е. достичь максимальной скорости движения за кратчайшее время.

Исследуя функцию изменения ускорений автомобиля от оборотов вала двигателя (1) на экстремум, было получено выражение для определения значений передаточного числа трансмиссии в зависимости от оборотов двигателя

$$i_{тр} = \sqrt[3]{\frac{0,1414r_k^3 G_a n_{max}^2 (kF / 13 / G_a + f_0 k_1) n}{9550 N_{max} \eta_{тр} (0,5 - n / n_{max})}} \quad (3)$$

где r_k – радиус качения колеса; G_a – полный вес автомобиля; n_{max} – максимальные обороты двигателя; kF – фактор обтекаемости; f_0 – коэффициент сопротивления качению при малых скоростях; k_1 – коэффициент, равный $(4...5)10^{-5}$; n – текущее значение числа оборотов вала двигателя; N_{max} – максимальная мощность двигателя; $\eta_{тр}$ – коэффициент полезного действия трансмиссии.

Область существования полученной функции (3) для определения передаточного числа трансмиссии $i_{тр}$ ограничена значениями оборотов двигателя $n < 0,5n_{max}$.

На рис. 2 в качестве примера представлена предлагаемая закономерность изменения передаточного числа вариатора в зависимости от оборотов вала двигателя автомобиля Subaru Impreza 2.0R.

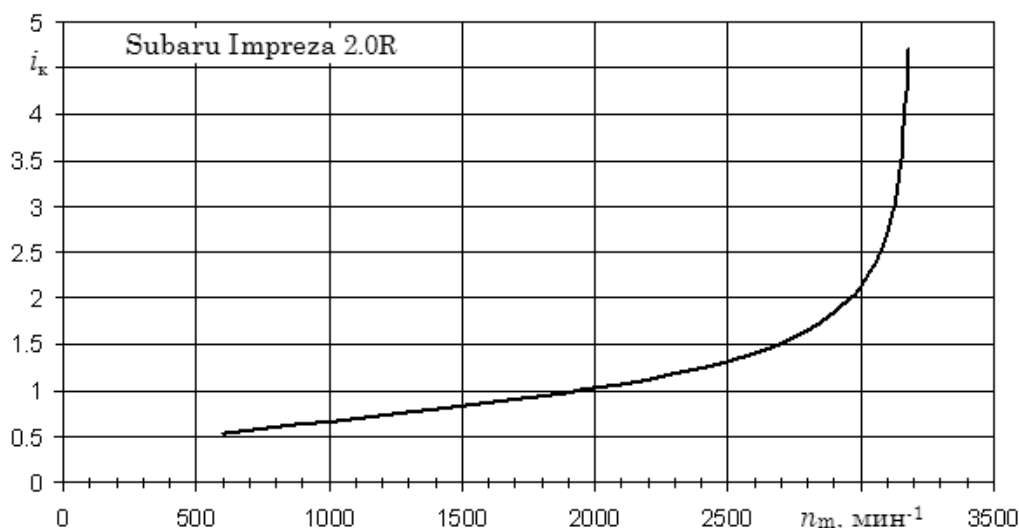


Рис. 2. Закономерность изменения передаточного числа вариатора в зависимости от оборотов двигателя автомобиля Subaru Impreza 2.0R

Использование закономерности (3) при выборе передаточного числа бесступенчатой трансмиссии в зависимости от оборотов вала двигателя позволило автомобилю двигаться с минимальным расходом топлива.

2. Результаты расчета. Сравнительные расчеты подтвердили сделанные предположения. Были произведены расчеты времени разгона и расхода топлива автомобиля Subaru Impreza 2.0R с серийной механической коробкой перемены передач и с серийным вариатором, передаточные числа которого изменялись во время разгона в первом случае согласно выражению (2), а во втором – согласно выражению (3). Результаты расчетов представлены соответственно на рис. 3 и 4.

Из графиков видно, что если во время разгона автомобиля с бесступенчатой трансмиссией передаточные числа её будут изменяться согласно закономерностям (2) и (3), то в первом случае автомобиль будет разгоняться до заданной скорости за самый короткий промежуток времени, а во втором случае расход топлива будет минимальным. И в том, и в другом случае поставленная цель достигнута: процесс разгона удалось сделать управляемым и оптимальным.

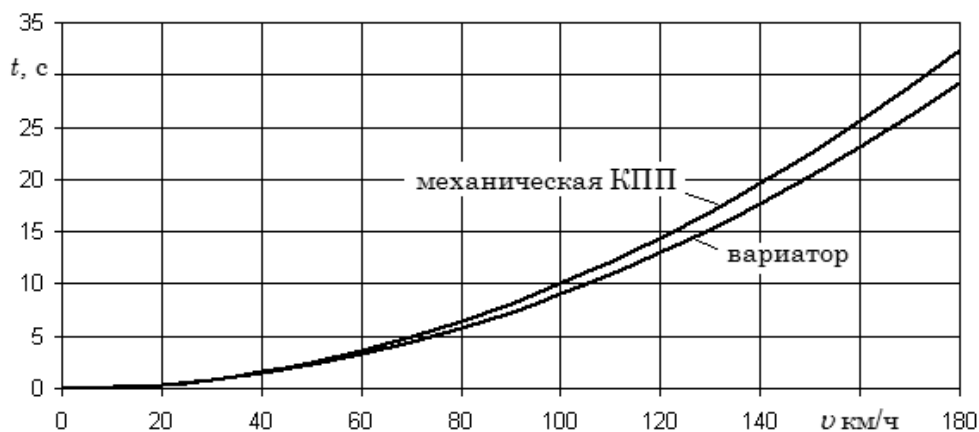


Рис. 3. Графики времени разгона автомобиля Subaru Impreza 2.0R

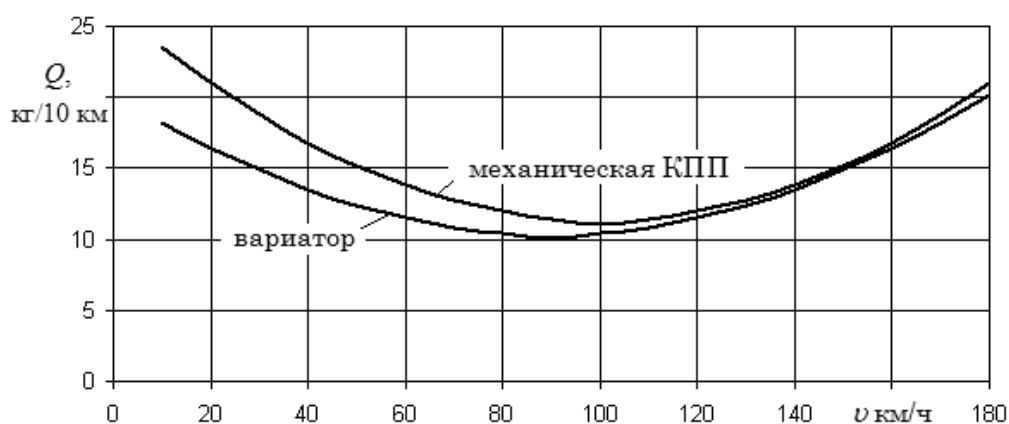


Рис. 4. Топливо-экономическая характеристика автомобиля Subaru Impreza 2.0R

Выводы. Аналитические выражения для уравнения тягового баланса (1) и, соответственно, математические модели разгона автомобиля в зависимости от поставленных задач могут и должны усложняться. Это бесспорно и определяется только допустимой погрешностью вычислений в каждом конкретном случае. На наш взгляд, данная работа показала главное – закономерность изменения передаточного числа бесступенчатой трансмиссии может быть управляемой, а самое главное – оптимальной в зависимости от режима движения автомобиля. Современный уровень развития средств автоматизации и управления позволяет реализовать этот процесс на практике.

Литература

1. Андреев, С.А. Автоматическая трансмиссия мокика / С.А. Андреев, Г.К. Рябов, С.С. Михеев // Вооружение, автоматика, управление: сб. науч. тр. – Ковров: КГТА, 2001. – Ч. 1. – С. 183–187.
2. Андреев, С.А. Расчёт параметров движения мокика с автоматической трансмиссией / С.А. Андреев, Г.К. Рябов, С.С. Михеев // Вооружение, автоматика, управление: сб. науч. тр. – Ковров: КГТА, 2001. – Ч. 1. – С. 188–193.
3. Бортницкий, П.И. Тягово-скоростные качества автомобилей / П.И. Бортницкий, В.И. Задорожный. – Киев: Издат. объединение «Вища школа», 1978. – 176 с.
4. К расчёту автоматического клиноремённого вариатора / В.Ф. Мальцев, Г.В. Архангельский, В.А. Умняикин, Ю.П. Поздняков // Детали машин. – Киев: Техника, 1982. – Вып. 34. – С. 9–15.
5. Мартыхин, Ю.М. Методика тягово-динамического расчета мототранспортного средства с автоматическим клиноремённым вариатором в силовой передаче / Ю.М. Мартыхин. – Серпухов: ВНИИмотопрот, 1975. – 18 с.
6. Русаков, С.С. Разработка методики оптимизации передаточных чисел механической сту-

пенчатой трансмиссии легкового автомобиля с учетом режимов работы его двигателя: дис. ... канд. техн. наук / С.С. Русаков. – Тольятти, 2007. – 134 с.

7. Рябов, Г.К. Автоматическая трансмиссия мототранспортных средств: теория, расчет и конструирование / Г.К. Рябов, С.А. Андреев. – Ковров: КГТА, 2006. – 92 с.

8. Рябов, Г.К. Алгоритм расчёта тягово-скоростных свойств мототранспортных средств с бесступенчатой автоматической трансмиссией / Г.К. Рябов, С.А. Андреев, Р.М. Грызунов // Бесступенчатые передачи и механизмы свободного хода: межвуз. сб. науч. тр. – Калининград: КГТУ, 2001. – С. 246–250.

9. Спиридонов, А.В. Обеспечение устойчивости работы автоматического клиноремённого вариатора / А.В. Спиридонов, Г.К. Рябов // Проблемы и достижения автотранспортного комплекса: материалы VI Всерос. НТК. – Екатеринбург: Изд-во УГТУ-УПИ, 2008. – С. 191–193.

10. Спиридонов, А.В. Анализ динамичности движения мототранспортных средств с автоматической трансмиссией / А.В. Спиридонов, Г.К. Рябов // Интеллектуальные системы в производстве. – Ижевск, 2008. – № 1. – С. 92–99.

11. Bents, D.J. Axial force and efficiency tests of fixed center variable speed belt drive / D.J. Bents // Soc. of Automotive Engr. Intern. Congr. and Exposition, 23–27 Feb. – Detroit, 1981. – № 810103. – P. 1–13.

12. Butler, K.L. A MATHLAB-based modeling and simulation package for electric and hybrid electric vehicle design / K.L. Butler // IEEE Transactions on vehicular technology. – 1999. – Vol. 48. – Iss. 6. – P. 1770–1778.

13. Hung, Y.H. Dynamic modeling and powertrain management of a hybrid electric scooter / Y.H. Hung, C.W. Hong // AVEC 00 International Symposium on Advanced Vehicle Control. – Michigan, USA, 2000.

14. James, I.B. The driveability of vehicles with continues variable transmissions. Report No. 31/95 / I.B. James // University of Bath, Sch. of Mech. Eng., 1995.

15. James, I.B. Dynamic modeling and validation of the regime change characteristics of a split power, infinitely variable transmission / I.B. James, N.D. Vaughan // IMechE International Seminar S540, 1997.

16. Nashat, J. A rule-based energy management strategy for a series hybrid vehicle / J. Nashat // American control conference, 1997.

17. Patterson, M. Transmission stability investigation / M. Patterson // Internal report-Torotrak (Development) Ltd Nov., 1993.

18. Richard F. Stieg, Wm. Spencer Worley Belt driven CVT is 85% efficient // Automotive Engineering. – 1982. – 90, № 7. – P. 36–40.

19. Role of simulation in the design of fluid power systems / D.G. Tilley, C.W. Richards, S.P. Tomlinson, C.R. Burrows // IF AC Symp CAD in control systems, 1991.

20. Weeks, R.W. Automotive engine modeling for real-time control using MATHLAB/SIMULINK / R.W. Weeks, J.J. Moskwa // SAE Technical Paper 950417. – 1995.

Рулевский Александр Дмитриевич, кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Автомобили и автомобильный сервис», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, rulevskiiad@susu.ru.

Уланов Александр Григорьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Колесные и гусеничные машины», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, ulanovag@susu.ru.

Хахалев Александр Ильич, преподаватель кафедры танковых войск, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, khakhalev@susu.ru.

Поступила в редакцию 13 октября 2017 г.

GONTINUOUSLY VARIABLE TRANSMISSIONS AND THEIR RATIO CHANGES

A.D. Rulevskiy, rulevskiiad@susu.ru,

A.G. Ulanov, ulanovag@susu.ru,

A.I. Khakhalev, khakhalev@susu.ru

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

Currently, in order to effectively use the engine's energy resources and implement the required properties of the car, manufacturers are trying to impart certain properties to the transmission design that will ensure the most complete coordination of their joint work. However, even the optimal constructive solution can not be universal, i.e. what is good for some operating conditions is not effective for other conditions. Therefore, today it is economically efficient to create vehicles intended for a certain, relatively narrow range of operating conditions.

The article suggests the methods of determining the optimum gear ratios of a continuously variable transmission of a car taking into account the mode of operation of its engine. The results of calculation of the towing-dynamic and fuel-economic indicators of a car compared to the actually existing prototype confirmed the hypotheses and give all the reasons for recommendation to use this method in practice when selecting gear ratios of a continuously variable transmission, depending on the mode of travel.

Keywords: a car, a variable speed drive, acceleration, gear ratio.

References

1. Andreev S.A., Ryabov G.K., Mikheev S.S. [Automatic Transmission of Mokiki]. *Vooruzhenie, avtomatika, upravlenie: sbornik nauchnykh trudov* [Armament, Automation, Control: Collection Papers]. Kovrov, 2001, part 1, pp. 183–187. (Russ.)
2. Andreev S.A., Ryabov G.K., Mikheev S.S. [Calculation of Parameters of Movement of Mokiki with Automatic Transmission]. *Vooruzhenie, avtomatika, upravlenie: Sbornik Nauchnykh Ttrudov* [Armament, Automation, Control: Collection Papers]. Kovrov, 2001, part 1, pp. 188–193. (Russ.)
3. Bortnitskiy P.I., Zadorozhnyy V.I. *Tyagovo-skorostnyye kachestva avtomobiley* [Traction-Speed Performance of the Car]. Kiev, Publishing Association Vishcha Shkola, 1978. 176 p.
4. Mal'tsev V.F., Arkhangel'skiy. G.V., Umnyashkin V.A., Pozdnyakov Yu.P. [To the Calculation of the Automatic V-belt CVT]. *Detali mashin* [Machine Parts]. Kiev, Technics Publ, 1982, iss. 34, pp. 9–15. (Russ.)
5. Martykhin Y.M. *Metodika tyagovo-dinamicheskogo rascheta mototransportnogo sredstva s avtomaticheskim klinoremennym variatorom v silovoy peredache* [Technique of Traction-Dynamic Calculation of the Motor Vehicle with an Automatic V-belt Variator in a Power Transfer]. Serpukhov, VNSI Automotiv Publ., 1975. 18 p.
6. Rusakov S.S., *Razrabotka metodiki optimizatsii peredatochnykh chisel mekhanicheskoy stupenchatoy transmissii legkovogo avtomobilya s uchetom rezhimov raboty ego dvigatelya. Aftoref.kand.diss.* [Development of a Technique of Optimisation of Gear Ratios Mechanical Step Transmission of the Car Taking Into Account Operating Modes of its Engine. dis. Abstract of Kand.Diss.]. Tolyatti Publ., 2007. 34 p.
7. Ryabov G.K., Andreev S.A. *Avtomaticheskaya transmissiya mototransportnykh sredstv: teoriya, raschet i konstruirovaniye* [Automatic Transmission for Motor Transport: Theory, Calculation and Design]. Kovrov: KSTA Publ., 2006. 92 p.
8. Ryabov G.K., Andreev S.A., Gryzunov R.M. [The Algorithm of Calculation of Traction-Speed Characteristics of Motor Vehicles with a Continuously Variable Automatic Transmission]. *Besstupenchatye peredachi i mekhanizmy svobodnogo khoda: Mezhvuzovskiy sbornik nauchnykh trudov* [Continuously Variable Transmission and the Mechanisms of Free Running: Interuniversity Collection of Scientific Papers]. Kaliningrad, 2001, pp. 246–250. (Russ.)

9. Spiridonov A.V., Ryabov G.K. [The resiliency automatic V-belt CVT]. *Problemy i dostizheniya avtotransportnogo kompleksa: materialy VI Vserossiyskoy NTK* [Problems and Achievements of Motor Transport Complex: Materials of the VI all-Russian STC]. Ekaterinburg, 2008, pp. 191–193. (Russ.)
10. Spiridonov A.V., Ryabov G.K. [Analysis of the Dynamics of Movement of Motor Transport with Automatic Transmission]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve* [Intelligent Systems in Manufacturing]. Izhevsk Publ., 2008, no. 1, pp. 92–99. (Russ.)
11. Bents D.J. Axial Force and Efficiency Tests of Fixed Center Variable Speed Belt Drive. *Soc. of Automotive Engr. Intern. Congr. and Exposition, 23–27 Feb.* Detroit, 1981, no. 810103, pp. 1–13.
12. Butler K.L. A MATLAB-Based Modeling and Simulation Package for Electric and Hybrid Electric Vehicle Design. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 1999, vol. 48, iss. 6, pp. 1770–1778.
13. Hung Y.H. Dynamic Modeling and Powertrain Management of a Hybrid Electric, Hong. *AVEC 00 International Symposium on Advanced Vehicle Control*. Michigan, USA, 2000.
14. James I.B. The Driveability of Vehicles with Continues Variable Transmissions. Report No. 31/95. *University of Bath, Sch. of Mech. Eng.*, 1995.
15. James I.B., Vaughan N.D. Dynamic Modeling and Validation of the Regime Change Characteristics of a Split Power, Infinitely Variable Transmission. *IMechE International Seminar S540*, 1997.
16. Nashat J. A Rule-Based Energy Management Strategy for a Series Hybrid Vehicle. *American Control Conference*, 1997.
17. Patterson M. Transmission Stability Investigation. *Internal Report-Torotrak (Development) Ltd Nov.*, 1993.
18. Richard F. Stieg, Wm. Spencer Worley Belt Driven CVT is 85 % efficient. *Automotive Engineering*, 1982, 90, No. 7, pp. 36–40.
19. Tilley D.G., Richards C.W., Tomlinson S.P., Burrows C.R. Role of Simulation in the Design of Fluid Power Systems. *IFAC Symposium on Computer Aided Design in Control Systems*, 1991.
20. Weeks R.W., Moskwa J.J. Automotive Engine Modeling for Real-Time Control Using MATLAB/SIMULINK. *SAE Technical Paper 950417*, 1995. DOI: 10.4271/950417

Received 13 October 2017

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Рулевский, А.Д. Бесступенчатые передачи и закон изменения их передаточных чисел / А.Д. Рулевский, А.Г. Уланов, А.И. Хахалев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2018. – Т. 18, № 1. – С. 17–23. DOI: 10.14529/engin180102

FOR CITATION

Rulevskiy A.D., Ulanov A.G., Khakhalev A.I. Continuously Variable Transmissions and Their Ratio Changes. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry*, 2018, vol. 18, no. 1, pp. 17–23 (in Russ.) DOI: 10.14529/engin180102